

نشریه مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/


انجمن بتن ایران


انجمن مهندسی روسازی ایران

اثر ناحیه جزرومدی، مکمل‌های سیمانی و مصالح دریایی بر برخی از پارامترهای دوام بتن*

مقاله پژوهشی

محمد جهانی [۱] شهره شاهنوری [۲] سعید مرادی [۳] محمد یزدانی [۴] سیروس ارشادی [۵]

DOI: 10.22067/jfcei.2023.83067.1239

چکیده *استفاده از ماسه لایروبی شده و آب دریا در تولید بتن با توجه به منابع اولیه این مواد، عملا درمحیط‌های دریایی، جزایر و بنادر توجیه‌پذیرتر است. از طرفی، بررسی پارامترهای دوام سازه‌های بتنی در محیط‌های دریایی خصوصا در شرایط جزرومدی بسیار حساس می‌باشد. بدلیل آنکه در این مناطق چرخه‌های متوالی خشک/مرطوب، گرادیان دما و رطوبت در طول زمان، روند کربناسیون و انتشار یون‌های رسانا را تشدید، و نهایتا زوال فیزیکی و شیمیایی بتن را تسریع می‌کند. هدف این تحقیق بررسی تاثیر پوزولان‌های متاکائولن، دوده سیلیس و سرباره‌کوره‌ذوب‌آهن بر خواص‌مکانیکی و ریزساختار بتن ساخته شده از ماسه و آب‌دریا در شرایط جزرومدی می‌باشد. نتایج نشان داد که استفاده از آب و ماسه‌دریا در بتن، به دلیل حضور نمک‌های کلرید و همچنین پرشدن خلل‌وفرج توسط اترینگایت ناشی از حمله‌ی سولفات‌ها، بهبود ٪۶/۸ خواص مکانیکی در سنین اولیه را به دنبال داشت، ولی پس از آن افت چشمگیری را تجربه کرد. دوده‌سیلیس به دلیل منبع بالای SiO_2 و همینطور واکنش‌پذیری بالا، با تسریع روند مصرف کلسیم‌هیدروکسید، ضمن جلوگیری از پیشروی کربناسیون، باعث تشکیل ژل کلسیم-سیلیکات-هیدرات متراکم با سطح مخصوص بالا در ریزساختار ناحیه‌ی انتقال بتن ساخته شده از آب و ماسه دریا شد. همچنین در حضور سولفات منیزیم، دوده سیلیس بهتر از سرباره و متاکائولن، از تشکیل اترینگایت و نهایتا گسترش حفرات و ریزترک‌ها جلوگیری کرد.*

واژه‌های کلیدی دوام بتن، خواص‌مکانیکی، ریزساختار بتن، ماسه لایروبی‌شده، شرایط جزرومدی.

Effect of Tidal conditions, Supplementary Cementitious Material and Marine's Material on Some of Concrete Durability Parameters

Mohammad Jahani Shore Shahnoori Saeed Moradi, Mohammad Yazdani Cyrus Ershadi

Abstract *The use of dredged-marine-sand and seawater for concrete production is practically more justified in marine environments due to the primary sources of these materials. Also, it is very crucial to examine the durability parameters of concrete structures in marine environments, especially in tidal conditions, because in these area, consecutive dry/wet cycles, temperature and humidity gradients over time, intensify carbonation and diffusion of conductive ions, therefore physical and chemical deterioration accelerated accordingly. The aim of this research is to investigate the effect of metakaolin, silica fume, and slag on the mechanical properties and microstructure Seawater-seasand concrete in tidal conditions. The results showed that the use of seawater and sand in concrete, due to the presence of chloride ions as well as the filling of voids by ettringite caused by the sulfates attacks, led to the improvement of mechanical properties in the early ages, but after that, a significant drop was occurred. Due to the high source of SiO_2 and its high reactivity, silica fume accelerated the consumption of calcium hydroxide, prevented carbonation progress, and formed a dense calcium-silicate-hydrate gel in the microstructure of Seawater-seasand-concrete, and in the presence of magnesium sulfate, better than slag and metakaolin, prevented the formation of ettringite and therefore, propagation of pores and microcracks.*

Key Words Durability of concrete, Mechanical properties, Concrete microstructure, Dredged marine sand, Tidal conditions.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۴/۴ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۵/۱۴می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، کارشناسی ارشد سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی، دانشگاه هرمزگان

Email: Jahani.m.edu@gmail.com

(۲) مدرس و محقق دانشکده ساختمان، دانشگاه صنعتی آیندهوون – هلند

(۳) کارشناس راه و ساختمان، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی واحد بندرعباس

(۴) کارشناسی ارشد سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی، دانشگاه هرمزگان

(۵) هیئت علمی گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه هرمزگان

مقدمه

در مناطق جزر و مدی، عمر مفید سازه‌های بتنی شدیدا به پارامترهای دوام و تعامل مکانیسم‌های شیمیایی و خواص فیزیکی آنها وابسته است. در این مناطق، انتقال یون‌های کلرید تحت تأثیر گرادیان دما و رطوبت، زوال فیزیکی و شیمیایی سازه‌های بتنی را در طول زمان تسریع می‌کند. همچنین، بتن در این مناطق، خواص مکانیکی بیشتری را نسبت به شرایطی که در مدت مشابه در معرض شرایط اتمسفری، غوطه‌وری (غرقابی) یا عمل‌آوری مرطوب قرار می‌گیرد، از دست می‌دهد [1]. به طور کلی، بتن غوطه‌ور در آب دریا عمدتا به واسطه‌ی واکنش‌های شیمیایی ناشی از حملات یون‌های موجود، صدف‌ها و میکروارگانیسم‌ها آسیب می‌بینند، اما اثرات مخرب شرایط جزر و مدی بر بتن شامل حمله یون‌های رسانا (کلریدها و سولفات‌ها)، کربناسیون، میکروارگانیسم‌ها و آسیب فیزیکی ناشی از گرادیان دما و رطوبت و همچنین فشار اعمال شده توسط امواج نیز می‌باشند. [3] ,[2].

استفاده از منابع دریایی مانند ماسه لایروبی شده و آب دریا در صنایع ساخت‌و ساز مخ صو صا بتن، با توجه به منابع اولیه مواد خام آن، عملا در جزایر و بنادر توجیه پذیرتر ا ست. از این رو، پارامترهای دوام (خواص مکانیکی و شیمیایی) بتن ساخته شده از ما سه لایروبی شده و آب خلیج‌فارس در مناطق دریایی با ید از طریق آز مایش های میدانی مورد تجز یه و تحلیل قرار گیرند. ما سه لایروبی شده دریا از جمله منابع فراوانی ا ست که به کارگیری آن نه تنها مو جب مدیر یت حجم وسیعی از سنگدانه‌های لایروبی و دپو شده در ساحل، و احیای زمین‌های با ارزش ساحلی میگردد، بل که منجر به لایروبی مداوم کریدورهای دریایی و تسهیل در شرایط عبور و مرور کشتی‌های تجاری و ماهی‌گیری شده و همچنین از تشکیل ریزگردهای حاصله از وزش باد نیز جلوگیری می‌کند [4]. منشا زیست شناسی ماسه دریا شبیه منشا ترکیباتی است که به عنوان سنگدانه رودخانه‌ای (معدنی) در بتن ا ستفاده می شوند، و تفاوت ا صلی بین ماسه معدنی با ماسه دریا، علاوه بر ابعاد، وجود مواد ارگانیک، نمک‌ها و صدف‌ها هستند [3].

یکی از نگرانی‌های مهم درحال حاضر در رابطه با مصرف ماسه دریا، وجود نمک‌های کلرید در آن است که میبایست به عنوان یکی از عوامل مهم تاثیرگذار بر دوام و عمر مفید و بلندمدت سازه‌های بتنی مدنظر قرار گیرد. از طرفی، دانه‌بندی یکنواخت ماسه دریا در صورت استفاده بیش از مقدار بهینه، ممکن است ساختار، یکپارچگی و اسکلت‌بندی بتن را تحت تاثیر قرار دهد [5]. در مناطق ساحلی و بنادر، استفاده از آب و ماسه لایروبی شده، با توجه به دسترسی آسان و عدم صرف هزینه‌های اضافی، اقتصادی، و در آینده‌ای نه چندان دور با وجود بحران کمبود آب شیرین اجتناب ناپذیر به نظر می‌رسد [4] ,[3]. از طرفی، استفاده از آب دریا در مخلوط بتن نیازمند اقداماتی به منظور کنترل رفتار مخرب آب دریا بر فاز عمل‌آوری و نفوذپذیری بتن بوده که نیازمند انجام آزمایشات گسترده در زمینه دوام و پایایی آن می‌باشد. مهم‌ترین تفاوت آب دریا با آب شرب، وجود نمک و سایر املاح است که عموما میزان نمک آن ٪ ۳/۵ و ترکیبات اصلی آن نیز شامل کلریدهای سدیم و پتاسیم، سولفاتهای سدیم، کلسیم و منیزیم و آهن است [6]. این املاح می‌توانند ضمن افزایش خلل وفرج در بلندمدت در بافت بتن، فاز عمل‌آوری شدن و میزان نفوذ کلرید را تحت تاثیر قرار دهند [7]. بررسی تحقیقات انجام شده در رابطه با تاثیر آب دریا بر خصوصیات مکانیکی بتن غیرمسلح نشان می‌دهد که آب دریا به دلیل دارا بودن نمک‌های $MgCl_2$, NaCl, $CaCl_2$، باعث کاهش اسلامپ، گیرش سریع‌تر، ترد شدگی بیشتر (در حالت بتن سخت شده) و نهایتا افزایش مقاومت فشاری بتن در سنین اولیه می‌شود، اما در بلندمدت به دلیل اثر یون‌های خورنده مانند سولفات‌ها و ایجاد تخلخل بیشتر، شاهد افت پارامترهای دوام و خواص مکانیکی این نوع بتن خواهیم بود [9] ,[8] ,[3]. استینور نیز نشان داد که در ابتدا مقاومت فشاری نمونه‌های بتن معمولی (بتن ساخته شده با ماسه معدن)، کمتر از مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با آب دریا بودند، ولی پس از گذشت زمان، مقاومت فشاری بتن ساخته شده با آب دریا حدود ۸–۱۵٪ کمتر از مقاومت فشاری بتن معمولی بود [7]، که این موضوع به دلیل کاهش نسبی تخلخل در کوتاه مدت می‌باشد [8]. از طرفی، تاثیر یون‌های کلرید در ترکیب با کربناسیون، منجر به نرخ خوردگی بالاتری می‌شود، از این رو، بررسی تاثیر یون‌های کلرید علاوه بر بتن‌های مسلح به میلگردهای فولادی، در موارد حضور CO_2 نیز ضروری به نظر می‌رسد. این ترکیب در درجه اول باعث ناپایداری نمک فرایدل (Friedel's salt) می‌شود که با انتشار بعدی کلریدها در بافت بتن، منجر به تجزیه آن می‌شود و در نهایت ظرفیت اتصال کلرید (Chloride binding capacity)

ماتریس خمیر سیمان کاهش پیدا می‌کند [10]. با کاهش ظرفیت اتصال کلرید خمیر سیمان، کلریدهای آزاد در خمیر سیمان پخش شده و به سمت میلگردها حرکت می‌کنند که منجر به خوردگی آنها و نهایتا کاهش عمر مفید سازهای بتنی در محیطهای دریایی می‌شوند. البته، خواص فیزیکی مطلوب فازهای ژلی مانند C-S-H نیز بر نرخ انتشار این یون‌ها موثر است. در واکنش کربناسیون، CO_2 با برخی از قسمت‌های جامد محصولات هیدراتاسیون مواد سیمانی به عنوان مثال هیدروکسید کلسیم و C-S-H واکنش می‌دهد و باعث تشکیل کلسیت و نهایتا پیشروی کربناسیون در بافت می‌شود [11]. غلظت بالای CO_2 بر pH یا قلیاییت خمیر سیمان تأثیر می‌گذارد و ممکن است از ۱۲ به حدود ۹ الی ۸ کاهش یابد که حل‌شدن فازهای افزایش دهنده‌ی ظرفیت اتصال کلرید (مانند نمک فریدل و نمک کوزل (Kuzel's salt)) را به دنبال خواهد داشت [10]. همچنین، واکنش کربناسیون در کامپوزیت‌های سیمانی و بتنی در معرض محیط‌های غیر اشباع، شدیدا به رطوبت نسبی بستگی دارد و رطوبت نسبی کم یا زیاد به شکلی موثر از آزاد شدن کلریدهای متصل شده جلوگیری می‌کند [11]. لازم به ذکر است که کلریدهای متصل شده (Bound chlorides) (به دام انداخته شده) توسط فازهای ژلی یا فازهای آلومینا، توانایی جدا شدن از این فازها و پیشروی به عمیق بتن (میلگردهای فولادی) را ندارند. بنابراین، شرایط جزر و مدی، و رطوبت نسبی ۸۰±۲۰٪ و با توجه به چرخه‌های تر/خشک متوالی، رطوبت نسبی ایده آل‌تری برای وقوع کربناسیون شدید و خوردگی بیشتر ناشی از حملات یون کلرید در مقایسه با سایر مناطق (غوطه‌ور یا اتمسفری) را دارد [3].

به طور کلی، در محیطهای دریایی، نرخ زوال بتن‌هایی که تماما از سیمان ساخته شده‌اند، می‌تواند به میزان پرتلندیته یا هیدروکسید کلسیم مرتبط باشد که آسیب پذیرترین محصول هیدراسیون سیمان در برابر حملات سولفات است [12]. در محیطهای دریایی، حملات مخرب سولفات عمدتا به محصولات هیدراسیون منبسط شونده مانند اترینگایت و $Ca(OH)_2$ و یا بعضا دولومیت (Dolomite) یا فازهای آلومینا (Alumina) (Al_2O_3) نسبت داده می‌شود. در موارد حضور سولفات‌ها، فشار ناشی از رشد کریستال‌های منبسط شونده باعث تشکیل منافذ و گسترش ریزترک‌ها شده، و نهایتا منجر به جذب آب در محیطهای قلیایی می‌شود [3]، که معمولا در این بین، اثر سولفات منیزیم ($MgSO_4$) به عنوان یکی از مخرب‌ترین سولفات‌ها در محیطهای دریایی در نظر گرفته می‌شود.

تحقیقات نشان داده‌اند که افزودن مقادیری از پوزولان‌های سیمانی (درصد بهینه)، منجر به بهبود خصوصیات مکانیکی بتن در بلندمدت و کوتاه‌مدت شده و به میزان چشمگیری باعث تثبیت و یا حتی بهبود پارامترهای دوام (خواص فیزیکی و شیمیایی) در شرایط سولفاتی و کلریدی میگردد[18]–[13], [4], [3]. به عنوان مثال، متاکائولن یک پوزولان طبیعی مبتنی بر سیلیس و از کلاس N است که به دلیل حضور منبع غنی SiO_2 و Al_2O_3 در ترکیبات شیمیایی خود می‌تواند خواص فیزیکی و شیمیایی ماتریس سیمان را بهبود بخشد. دوده‌سیلیس به عنوان یک پوزولان ریزدانه با واکنش پذیری بالا و تصفیه‌کننده ساختار منافذ، ضمن داشتن ٪۹۰ SiO_2، خواص فیزیکی بتن را بهبود می‌بخشد [19]. سرباره کوره ذوب آهن (Ground granulated blast furnace slag) (GGBS)، به عنوان یک محصول جانبی و ضایعاتی، به دلیل حضور منابع بیشتر آهک (CaO) در ترکیبات شیمیایی خود در مقایسه با متاکائولن و دوده‌سیلیس، قلیاییت بالاتری دارد که باعث واکنش پذیری کم با رطوبت، به ویژه در کوتاه مدت می‌شود. بنابراین، خواص مکانیکی بتن حاوی سرباره در سنین اولیه باید توسط یک فعال‌کننده مانند اکسید منیزیم یا دوده‌سیلیس بهبود یابد [20] و [21].

با بررسی منابع گذشته مشاهده شد که استفاده از این مصالح دریایی (ماسه لایروبی شده و آب دریا) به دلیل وجود منابع یون‌های کلرید و سولفات، دوام بتن را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. به علاوه، محققان نشان دادند ترکیبات شیمیایی سیمان که حاوی میزان زیادی آهک است، مکانیزم‌های فرسایش این نوع بتن را تشدید می‌کند که در این خصوص افزودن پوزولان‌هایی به منظور کاهش سیمان مصرفی و تغییر خواص شیمیایی و فازهای هیدراسیون و عمل‌آوری بتن را پیشنهاد دادند. بنابراین، توسعه‌ی دامنه‌ی تحقیقات در رابطه با بهبود دوام این نوع بتن، مخصوصا در محیطهای دریایی، با در نظر داشتن مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی اشاره شده، و همچنین محدودیت‌های تامین مصالح در جزایر و مناطق دریایی برای تولید بتن، راه حل کاربردی به نظر می‌رسد که نیازمند تحقیقات گسترده و آزمایش‌های میدانی می‌باشد. لذا ضروری است با جایگزینی مقادیر بهینه مصالح پوزولانی با ترکیبات شیمیایی مختلف با هدف تغییر

خواص بنیادی بتن (مکانیکی و شیمیایی)، و کنترل مکانیزم‌های فرسایشی بتن در محیط‌های دریایی، دوام و عمر مفید سازه‌های بتنی در این مناطق را بهبود بخشید.

هدف انجام این پژوهش به طور خلاصه شامل موارد زیر می‌شود:

۱. ارزیابی اثربخشی پوزولان‌های متاکائولن، دوده‌سیلیس و سرباره کوره‌ذوب‌آهن در بهبود مقاومت فشاری، ریز ساختار و تخلخل بتن ساخته شده از آب و ماسه خلیج‌فارس در شرایط جزرومدی.

۲. ارزیابی تاثیر پوزولان‌های متاکائولن، دوده‌سیلیس و سرباره کوره‌ذوب‌آهن بر پیشروی واکنش کربنا سیون و نرخ حرکت یون‌های رسانا (مانند کلرید و سولفات) در بافت بتن، و تشکیل فازهای حجیم شونده (مانند اترینگایت و گچ) ناشی از حمله سولفات منیزیم.

۳. تو سعه رویکرد علمی و کاربردی به منظور ا ستفاده از آب و ماسه لایروبی‌شده خلیج‌فارس در تولید بتن غیرمسلح با دوام و سازگار در محیط‌های دریایی.

۴. جایگزینی آب دریا با آب شرب در تولید بتن غیرمسلح، و مقابله با بحران کمبود آب آشامیدنی

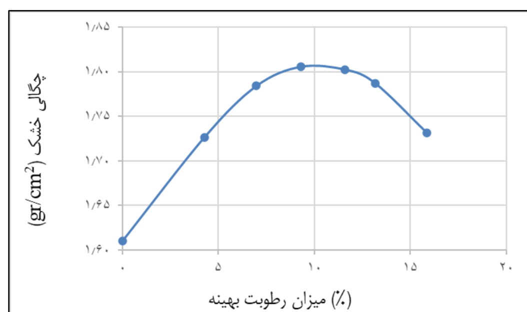
۵. کاهش آلودگی زیست‌محیطی ناشی از ریزگردهای حاصله از دپوهای گسترده ماسه لایروبی‌شده در حاشیه‌ی سواحل

مصالح مصرفی و برنامه‌آزمایشگاهی

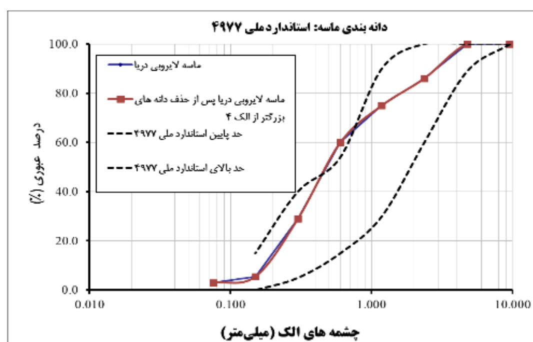
مصالح مصرفی

سنگدانه

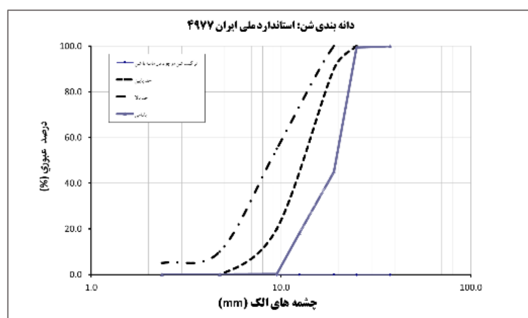
سنگدانه‌های استفاده شده در این تحقیق شامل درشت‌دانه معدنی مستخرج از معدن میناب (۷۶–۴/۱۹ میلیمتر)، ریزدانه معدنی (۴/۷۶ میلیمتر)، ما سه لایروبی شده دریا (۴/۷۶ میلیمتر)، حاصل از عملیات لایروبی فاز سوم بندر شهید رجایی در استان هرمزگان می‌باشند. منحنی رطوبت بهینه ماسه دریا در شکل (۱)، و منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق در شکل (۲) نشان داده شده است. مقادیر فلزات سنگین موجود در ماسه دریا در جدول (۱)، مشخصات و ترکیبات شیمیایی مصالح سیمانی و سنگدانه‌های مصرفی نیز در جدول (۲) ارائه شده است.



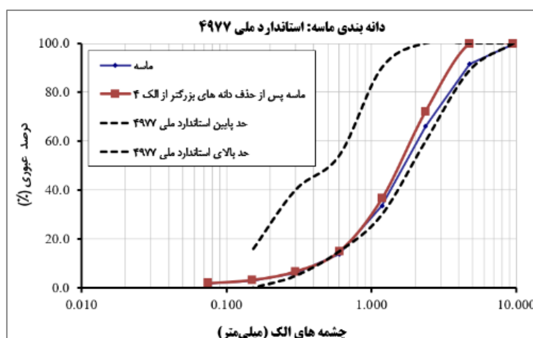
شکل ۱ منحنی رطوبت بهینه ماسه خلیج‌فارس



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲ منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی؛ (الف) ماسه خلیج‌فارس، (ب) شن معدنی، (ج) ماسه معدنی

جدول ۱ مقادیر فلزات سنگین موجود در ماسه لایروبی شده خلیج‌فارس (ppm)

Ag	As	Ca	Cd	Ce	La	Li	Mn	Y
<۰/۱	۱۰	<۳	<۰/۵	۹	۵	۴	۵۷۱	۵
Mo	Ni	Co	Cr	Cu	Fe	P	Pb	V
۲	۲۱	۶	۲۶	۱۰	>۳	۴۶۹	۷	۲۴
S	Sb	Yb	Zn	Sc	Sn	Th		
۱۴۲۸	۴	۱	۱۷	۲	<۱	۲		

جدول ۲ ترکیبات شیمیایی سنگدانه‌ها و مصالح پوزولانی

اکسید (٪)	ماسه دریا	ماسه معدن	شن معدن	سیمان	متاکائولن	دوده‌سیلیس	سرباره
SiO_2	۱۳/۵	۳/۸	۱۲/۰۵	۲۱	۵۱	۹۲	۳۶/۵
Al_2O_3	۲/۵۵	۱/۲	۲/۰۵	۵	۴۱/۱	۰/۹	۱۲/۵
CaO	۳۹/۸	۴۵/۱	۳۹/۰۵	۶۴	۱/۴۶	۱	۳۸/۱
MgO	۲/۹۵	۱۰/۲	۵/۳۱	۲	۰/۰۵	۱/۲۵	۹/۶
Na_2O	۰/۷۵	۰/۲۵	۰/۳۷	۰/۴	۰/۰۱	۰/۴	۰/۴۵
K_2O	۰/۵۳	۰/۱۶	۰/۳	۰/۶	۰/۰۴	۰/۳	۰/۷۵
SO_3	۰/۶۱	۲/۳۵	۰/۲۷	۲	۰/۱۲	–	۰/۶۵
Fe_2O_3	۲/۶۲	۰/۹۲	۱/۹	۰/۷۵	–	۰/۸	۰/۳۵
Cl	۰/۸	۰/۰۷	۰/۰۳	–	–	–	–

آب مصرفی و فوق روانکننده

در این تحقیق آب شرب شهر بندرعباس به عنوان آب طرح اختلاط آزمونه شاهد FwC (آب شرب + ماسه معدن) مورد استفاده قرار گرفته است. آب خلیج‌فارس نیز به عنوان آب طرح اختلاط آزمونه شاهد SwC (آب دریا + ۲۵٪ ماسه ماسه لایروبی شده) در نظر گرفته شد که حاوی منیزیم:۱۶۰۰، کلسیم: ۴۸۰، سدیم:۱۲۶۰۰، پتاسیم:۴۸۰، سولفات ۳۳۰، و کلرید: ۲۳۴۰۰ (ppm) می‌باشد. فوق روان‌کننده مورد استفاده در این تحقیق PC-۵۰۰۰، بصورت مایع و قهوه‌ای رنگ، با دانسیته ۱/۲ کیلوگرم بر لیتر و تهیه شده از شرکت رزین سازان فارس می‌باشد که بر پایه پلیمرهای نفتالین‌های سولفات تولید شده است.

مصالح سیمانی

در این تحقیق سیمان پرتلند تیپ ۲، متاکائولن، دوده‌سیلیس و سرباره کوره ذوب‌آهن به عنوان مواد سیمانی مورد استفاده قرار گرفته است که به ترتیب از کارخانه سیمان هرمزگان (بندرخمیر)، شرکت جهان پودر دلیجان، کارخانه فروآلیاژ ایران و کارخانه ذوب‌آهن اصفهان تهیه گردیده‌اند. مشخصات فیزیکی این مواد در جدول (۳)، و مشخصات شیمیایی آنها در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۳ مشخصات فیزیکی پوزولانها

سطح مخصوص	سایز دانه	وزن مخصوص	LOI	پوزولان
(m^2/gr)	(μm)	(gr/cm^3)	(%)	
۲۰	۰/۲۲۹	۲/۲	۰/۴	دوده‌سیلیس
۰/۲۲	۵۰–۱۰	۲/۷۴۵	۰/۱۹	سرباره
۲/۲	۲–۱	۲/۶	۱	متاکائولن

ساخت نمونه‌ها و برنامه‌ی آزمایشگاهی

ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها

در این تحقیق تمامی نمونه‌های مکعبی بتن، به ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلیمتر ساخته شده و در شرایط ایده‌آل آزمایشگاهی در دمای ۲۶°c و میانگین رطوبت محیطی ٪۶۸ به دو صورت: ۱- مرطوب: با استفاده از پوشش کتانی خیس بر روی آزمونه‌های قالب‌گیری شده به مدت ۲۴ ساعت و ۲- غرقاب، درسنین ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری شدند (شکل ۳). سپس آزمونه‌ها به شرایط جزرومدی در خلیج‌فارس (خط ساحل)

منتقل، و به مدت ۶ ماه نگهداری و پایش شدند (شکل ۴). الگوریتم روش تحقیق حاضر نیز در شکل (۵) ارائه شده است. در این تحقیق کلیه طرح اختلاط‌ها با نسبت آب به سیمان ۰/۴ ساخته شدند که مجموعا شامل ۸ طرح اختلاط می‌باشند. دو نمونه طرح‌اختلاط شاهد، ۱: آب شرب و ماسه معدن، ۲: شامل آب دریا و ماسه لایروبی شده، فاقد هرگونه افزودنی پوزولانی در نظر گرفته و ساخته شدند. همچنین دمای بتن تازه حدود ۳۲–۲۷ °c اندازه‌گیری شد. در هر مرحله از ساخت نیز ابتدا درصد رطوبت نسبی سنگدانه‌ها، مطابق ASTM C56 [22] و همچنین چگالی مصالح و میزان جذب آب آنها بر اساس ASTM C128-15 [23] تعیین و پس از اصلاح طرح اختلاط، مصالح مجددا توزین و مخلوط شدند. نتایج بد ست آمده از آزمایش‌های فوق در جدول (۴) نمایش داده شده است. آزمایش اسلامپ بر روی تمامی طرح اختلاط‌های بتن تازه، طبق استاندارد ASTM C143 [24] انجام و در حدود ۱۵۰–۱۰۰ mm اندازه‌گیری شدند.


(الف)


(ب)


(ج)

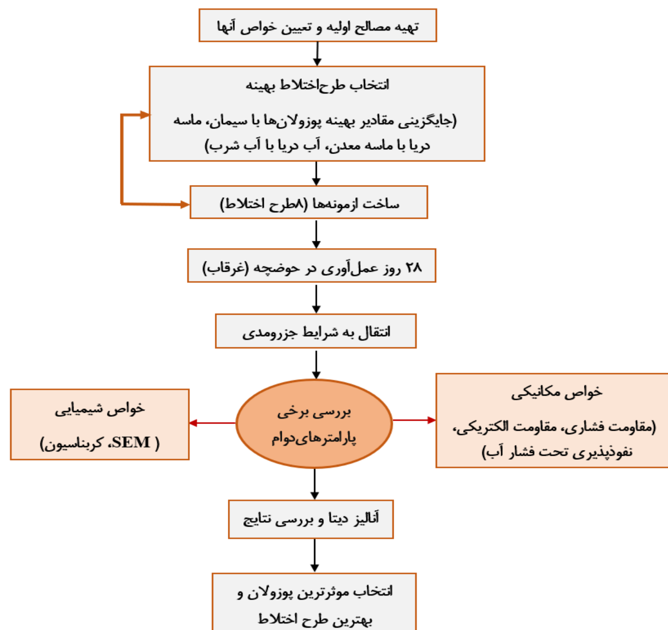
شکل ۳ آزمونه‌های بتنی ساخته شده با آب دریا؛ (الف) قالب‌گیری آزمونه‌ها، (ب) اثرات چشمی استفاده از آب دریا به عنوان آب اختلاط بر بتن تازه، (ج) عمل‌آوری آزمونه‌ها در حوضچه آب شرب تا سن ۲۸ روز


(الف)


(ب)


(ج)

شکل ۴ (الف) آزمونه‌ها در شرایط جزرومدی خلیج‌فارس هنگام جزر، (ب) نمونه‌های بتنی در سواحل خلیج‌فارس هنگام مد، (ج) پوسته‌ها، صدف‌ها و میکروارگانیسم‌ها رشد کرده بر سطوح نمونه‌های بتن پس از ۶ ماه



شکل ۵ الگوریتم روش انجام تحقیق

جدول ۵ معرفی ترکیب‌های مورد بررسی

کد نمونه	w/cm	آب شرب (kg/m^3)	آب دریا (kg/m^3)	شن معدنی (%)	ماسه معدنی (%)	ماسه دریا (%)	سیمان (kg/m^3)	متاکائولن (kg/m^3)	دوده‌سیلیس (kg/m^3)	سرباره (kg/m^3)	اسلامپ (mm)
FwC	۰/۴	۱۶۰	-	۴۵	۵۵	۰	۴۰۰	-	-	-	۱۲۰
SwC	۰/۴	-	۱۶۰	۴۵	۴۱/۲۵	۱۳/۷۵	۴۰۰	-	-	-	۱۲۰
SwCM	۰/۴	-	۱۶۰	۴۵	۴۱/۲۵	۱۳/۷۵	۳۸۰	۲۰	-	-	۱۲۰
SwCS	۰/۴	-	۱۶۰	۴۵	۴۱/۲۵	۱۳/۷۵	۳۶۰	-	۴۰	-	۱۲۰
SwCG	۰/۴	-	۱۶۰	۴۵	۴۱/۲۵	۱۳/۷۵	۳۴۰	-	-	۶۰	۱۲۰
SwCMS	۰/۴	-	۱۶۰	۴۵	۴۱/۲۵	۱۳/۷۵	۳۴۰	۲۰	۴۰	-	۱۰۰
SwCMG	۰/۴	-	۱۶۰	۴۵	۴۱/۲۵	۱۳/۷۵	۳۲۰	۲۰	-	۶۰	۱۲۰
SwCSG	۰/۴	-	۱۶۰	۴۵	۴۱/۲۵	۱۳/۷۵	۳۰۰	-	۴۰	۶۰	۱۱۰

در این تحقیق از مقادیر بهینه پوزولان‌ها شامل: دوده‌سیلیس ۱۰٪ [3]، سرباره ۱۵٪ [5]، و متاکائولن ۵٪ وزنی سیمان با عیار ($400\ kg/m^3$) [25]، جایگزین سیمان شدند تا تاثیر هر یک به صورت دقیق بر خواص مکانیکی و ریزساختار بتن ساخته شده از ماسه لایروبی‌شده و آب دریا ارزیابی گردد. درصد بهینه ماسه لایروبی شده به میزان ۲۵٪ وزن مصالح سنگی ریزدانه (ماسه) می‌باشد [5–3]. ترکیب‌های مورد بررسی و کد آنها، به همراه نسبت‌های اختلاط مصالح و افزودنی‌ها و نسبت آب به مواد سیمانی (w/cm), و میزان اسلامپ آنها در جدول (۵) ارائه شده است.

برنامه‌ی آزمایشگاهی

مقاومت فشاری بتن. آزمایش مقاومت فشاری مطابق استاندارد BS 1881 [26] بر روی آزمونه هایی ۷ و ۲۸ روز بصورت غرقاب عمل‌آوری شده، و آزمونه‌هایی ۱۸۰ روز قرار گرفته در شرایط جزرومدی، انجام شد.

مقاومت الکتریکی ویژه بتن. آزمایش مقاومت الکتریکی بر روی آزمونه‌های ۷ و ۲۸ روز بصورت غرقاب عمل‌آوری شده، و آزمونه‌های ۱۸۰ روزه جزرومدی مطابق با استاندارد ACI 222 [27] به روش ۴ نقطه‌ای Wenner انجام شد. در این روش از چهار نقطه استفاده می‌شود که با سطوح نمونه در تماس هستند، سپس یک جریان برق متناوب بین الکترودها برقرار می شود، و اختلاف پتانسیل (V) بین الکترودها اندازه‌گیری می گردد. در مطالعات صورت گرفته بر روی سازه‌های در معرض خوردگی مشخص شده که رابطه‌ی نزدیکی بین سرعت خوردگی و مقاومت الکتریکی بتن وجود دارد، در همین راستا ACI 222 استانداردی جهت تفسیر نتایج مقاومت الکتریکی و تخمین کیفیت بافت بتن ارائه کرده است که در جدول (۶) نشان شده است و همچنین به عنوان معیار بررسی نتایج آزمایش در این تحقیق در نظر گرفته شده است. به طور کلی این آزمایش، مقاومت بافت بتن در برابر حرکت، نفوذ و پخش یون‌های رسانا مانند کلرید و سولفات را مورد بررسی قرار می‌دهد. لازم به ذکر است که نفوذ و پخش این یون‌ها درون بافت بتن از دو طریق کنترل می‌گردد: ۱) فیزیکی: خواص فیزیکی مطلوب فاز های ژلی مانند C-S-H که یونها را به دام می‌اندازند و از حرکت و انتشار آنها جلوگیری می‌کنند، ۲) شیمیایی: وجود فازهای آلومینا و به طور کلی ترکیبات حاوی آلومینیوم که حرکت یون های کلرید را مختل می‌کنند و اصطلاحا به صورت شیمیایی باعث افزایش ظرفیت اتصال کلرید خمیر سیمان می‌گردند.

جدول ۶ ارتباط بین نرخ خوردگی و نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی

قاومت الکتریکی kΩ/cm	نرخ خوردگی
>۲۰	کم
۱۰–۲۰	متوسط
۵–۱۰	زیاد
<۵	خیلی زیاد

نفوذپذیری بتن تحت فشار آب. این آزمایش، عمق نفوذ آب در آزمونه‌ها تحت فشار آب را اندازه‌گیری می‌کند که شدیدا وابسته به توزیع خلل و فرج، ریزترک‌ها و حفرات مویینه انتقال رطوبت و میزان پیچیدگی اتصالات آنها با یکدیگر می‌باشد. این آزمایش بر روی نمونه‌های بتنی با سن ۲۸ روز بر اساس استاندارد BS EN 12390-8 [28] انجام شد. آزمونه‌ها پس از انجام آزمایش، از مرکز آن به دو نیم تقسیم شدند تا حداکثر میزان عمق نفوذ آب در بتن اندازه‌گیری گردد.

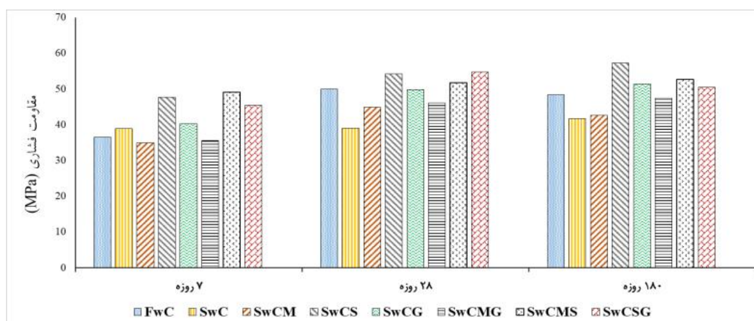
عمق کربناسیون بتن. فنل فتالئین (تولید شرکت مرک، آلمان) با غلظت ٪۱ (محلول در الکل) بر روی سطح داخلی آزمونه‌ی دو نیم شده اسپری گردید تا عمق کربناسیون آزمونه‌ها پس از خشک شدن سطوح، مشاهده و اندازه‌گیری شود [29]. نتایج این آزمایش به طور کلی به سه ناحیه: ۱-کربناته نشده (رنگ قرمز-صورتی)، ۲-نیمه کربناته یا نسبتا کربناته شده (صورتی روشن)، ۳-کربناته شدید (بدون رنگ) تقسیم می‌شود. pH این نواحی از ۱۲ (در مناطق قرمز رنگ) تا حدود ۸ (کربناته شدید) متغیر است که عمدتا به علت میزان هیدروکسید کلسیم موجود در ماتریس خمیر سیمان بوده است. حداکثر فاصله از لبه در هر طرف نمونه‌ها تا منطقه کربناته شدید با استفاده از کولیس (با دقت ۱ میلی‌متر) اندازه‌گیری شد و میانگین چهار فاصله اندازه‌گیری شده، به عنوان عمق کربناسیون آزمونه در نظر گرفته شد.

بررسی ریزساختار بتن (SEM). ریزساختار بتن سخت شده توسط دستگاه عکسبرداری الکترونی روبشی (SEM) (Scanning electron microscope) بررسی شد تا به عنوان مبنایی به منظور بررسی ریزساختار بتن در نظر گرفته شود. از این آزمایش برای بررسی ویژگی‌ها و توزیع منافذ، تغییرات مورفولیژیکی و روابط شکل‌گرفته شده بین اجزای در تماس با یکدیگر، در ساختار بتن و حتی بررسی محصولات نهایی فرآیند هیدراسیون در بتن استفاده می‌شود. میکروسکوپ اسکنر الکترونی استفاده شده در این تحقیق مدل Tescan vega ساخت کشور جمهوری چک بوده و تصاویر با دقت ۱۰ هزار برابری اندازه‌گیری شدند.

نتایج و بحث

مقاومت فشاری بتن

استفاده از آب دریا و ٪۲۵ ماسه لایروبی شده خلیج‌فارس در مخلوط بتن (جایگزین ماسه معدن)، مقاومت فشاری ۷ روزه بتن را در مقایسه با نمونه شاهد به میزان ٪۶/۸ افزایش داده است، که این افزایش مقاومت به دلیل حضور نمک‌های کلرید ($MgCl_2$, $NaCl$, $CaCl_2$) است که فاز عمل‌آوری و گیرش بتن را تسریع می‌کنند (شکل ۶) [30]. همچنین وجود سولفات منیزیم در آب دریا باعث تشکیل گسترده‌تر محصولات منبسط شونده (مانند اترینگایت) در خمیر سیمان شده که در سنین اولیه تخلخل را کاهش می‌دهند و به همین دلیل باعث بهبود نسبی خواص مکانیکی شده‌اند [30]. بررسی نتایج نشان می‌دهد مقاومت فشاری بتن SwC، پس از سن ۷ روزگی، افزایش قابل توجهی را تا سن ۱۸۰ روز تجربه نکرده است، که این تثبیت ناشی از افزایش حجم محصولات منبسط شونده در خمیر سیمان (افزایش ریزترک‌ها و حفرات) در سنین اولیه، و در طرف مقابل، هیدراسیون کامل مصالح سیمانی در محیط مرطوب و گیرش نهایی بتن بوده است. تغییرات مقاومت فشاری در نمونه شاهد پس از ۲۸ روز قرارگیری در شرایط جزرومدی چشمگیرتر بوده است که نشان‌دهنده‌ی تخلخل کمتر، به واسطه‌ی عدم تشکیل بیش از حد اترینگایت و گچ ناشی از حضور سولفات‌ها بوده است [3].



شکل ۶ نتایج آزمون مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روز بصورت غرقاب عمل‌آوری شده، و ۱۸۰ روز نگهداری شده در شرایط جزر و مدی خلیج‌فارس

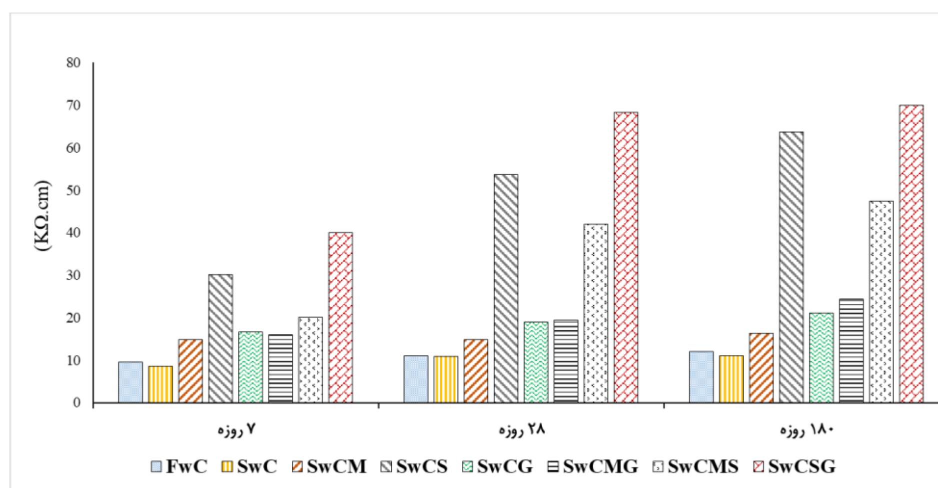
افزودن متاکائولن به طرح اختلاط SwC، باعث افزایش مقاومت فشاری به میزان ٪۱۴/۸ در سن ۲۸ روزگی بتن شد و پس از آن کاهش ٪۵ مقاومت فشاری را در سن ۱۸۰ روزگی تجربه کرد. در این خصوص مطالعات قبلی گزارش کرده‌اند که اثر متاکائولن بر مقاومت فشاری SwC متفاوت بوده و تاثیر یکنواخت و ثابتی ندارد و عمدتا باعث افزایش قابل ملاحظه‌ی مقاومت فشاری بتن نخواهد شد [25].

افزودن ٪۱۵ سرباره، زمان گیرش اولیه بتن SwC را کاهش داده و باعث افزایش مقاومت فشاری آن در سنین ۲۸ و ۱۸۰ روزگی به میزان حدود ٪۲۰ شده است، با این حال افزودن سرباره تاثیر چشمگیری در مقاومت فشاری ۷ روزه بتن SwC نداشته است. در این خصوص تحقیقات گذشته بیان کردند که سرباره خاصیت شدید پوزولانی و سرعت واکنش‌پذیری مناسبی ندارد و در صورت استفاده از آن می‌بایست با پوزولان‌های دیگر (مانند اکسید منیزیم و یا دوده سیلیس)، اصطلاحا "فعال" (Active) گردد که این موضوع در ترکیب دوده‌سیلیس و سرباره به خوبی قابل مشاهده است و به دلیل حضور دوده‌سیلیس، سرباره فعال شده و مقاومت فشاری این ترکیب افزایش یافته است. از طرفی، استفاده از ٪۱۰ دوده‌سیلیس در بتن SwC منجر به کاهش چشمگیر زمان گیرش و افزایش قابل توجه مقاومت فشاری آن در تمام سنین شده است [31]. لازم به ذکر است مشاهدات تجربی حین ساخت نمونه‌های بتنی آزمایشگاهی نیز نشان داد که افزودن دوده‌سیلیس به بتن منجر به نرخ جذب رطوبت بیشتر در مقایسه با سرباره و متاکائولن شد و هنگامی که با آب دریا ترکیب می‌شود، خمیر سیمان سریعتر از افزودن متاکائولن و سرباره سخت می‌گردد (گیرش سریعتر) [32]. دوده‌سیلیس به دلیل دارا بودن بیش از ٪۹۰ SiO_2 در ترکیبات شیمیایی خود، منجر به بهبود خواص مکانیکی و شیمیایی فازهای ژلی (مانند C-S-H) شده، و همچنین با پر کردن حفرات مویینه باعث جلوگیری از نفوذ یون سولفات و تشکیل اترینگایت و گسترش ریزترک‌ها شده، و در نهایت نیز تراکم و مقاومت فشاری بتن را افزایش داده است.

استفاده از ترکیب پوزولان‌های متاکائولن، دوده‌سیلیس و سرباره در بتن ساخته شده از آب و ماسه خلیج‌فارس (SwC) عمدتا باعث افزایش مقاومت فشاری در تمام سنین شد، که حضور دوده‌سیلیس (٪۱۰) در افزایش مقاومت فشاری طرح‌اختلاط‌های ترکیبی موثرتر به نظر می‌رسد.

مقاومت الکتریکی ویژه بتن

دو نوع بتن شاهد FwC (آب شرب و ماسه معدن) و SwC (آب دریا و ماسه لایروبی شده) تقریبا به نتایج مشابهی دست یافتند (شکل شماره ۷)، که نشان می‌دهد نوع آب اختلاط تفاوت چشمگیری در نتایج آزمون مقاومت الکتریکی نمونه‌ها نداشته و تغییرات اساسی در نتایج به واسطه‌ی حضور پوزولان‌ها بوده است [3].

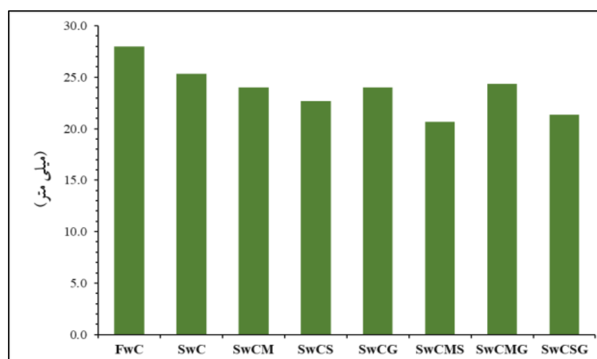


شکل ۷ نتایج آزمون مقاومت الکتریکی آزمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روز بصورت غرقاب عمل‌آوری شده، و ۱۸۰ روز نگهداری شده در شرایط جزر و مدی خلیج‌فارس مطابق با ACI 222 [27]

نتایج نشان می‌دهد متاکائولن مقاومت SwC در برابر انتشار یون کلرید و سولفات را در تمام سنین بهبود بخشیده است. این موضوع به دلیل خاصیت پرکنندگی موثر این پوزولان، و همچنین حضور مقادیر بالای Al_2O_3 در ترکیبات شیمیایی آن بوده (جدول ۲)، که توانایی جذب و به دام انداختن یون‌های رسانا مانند کلرید را دارد و از حرکت آنها بدین وسیله جلوگیری کرده است. لذا متاکائولن در وهله‌ی اول به واسطه‌ی ترکیبات شیمیایی و سپس با افزایش سطح مخصوص و سپس با بهبود تراکم ریزساختار ژل C-S-H باعث افزایش ظرفیت اتصال کلرید شده است. حضور دوده‌سیلیس تأثیر قابل توجهی بر مقاومت الکتریکی SwC داشته است [8]. دوده‌سیلیس، با توجه به ذرات بسیار ریز خود، حفرات مویینه بتن را پر کرده و با تشکیل ژل C-S-H متراکم، مانع عبور یون‌های رسانا مانند کلرید و سولفات در محیط دریا شده است و به این دلیل که ترکیبات آن حاوی مقادیر اندکی آلومینا است، به لحاظ شیمیایی تاثیری در جذب یون کلرید نداشته و عمدتا به لحاظ فیزیکی ظرفیت اتصال کلرید بتن SwC را به میزان چشمگیر ٪۴۷۰ افزایش داده است. به علاوه، این پوزولان، مقاومت الکتریکی SwC را تا $۶۰k\Omega/cm$ افزایش داده، که نشان می‌دهد از لحاظ تئوری، این نوع بتن در محیط‌های خورنده بسیار مقاوم است [27]. ویلیام و همکاران، نتایج مشابهی را در مورد افزایش مقاومت الکتریکی بتن با استفاده از دوده‌سیلیس در بتن گزارش کردند [33]. علاوه بر این، ارتباط معنا داری بین نتایج این آزمایش و مقاومت فشاری، مخصوصا برای نمونه SwCS وجود دارد؛ این موضوع به این دلیل است که هر دو آزمایش تابع ماتریس تخلخل بتن هستند. مشاهدات نشان داد که سرباره، تاثیر مثبت و قابل توجهی در طول زمان در نتایج این آزمایش نداشته است. این موضوع احتمالا به این دلیل است که ترکیبات شیمیایی سرباره کوره ذوب‌آهن، توانایی جذب و مختل کردن حرکت یون‌های رسانا را ندارند، بنابراین، این پوزولان عمدتا به لحاظ فیزیکی قادر به کند کردن حرکت و انتشار این یون‌هاست. اما مقادیر بالای آهک در سرباره نسبت به دوده‌سیلیس و متاکائولن، منجر به تشکیل بیشتر هیدروکسیدکلسیم و واکنش‌پذیری بیشتر با سولفات‌های موجود شده که درنهایت ترک و حفرات موینه بیشتری را ایجاد کرده است که حرکت این یون‌های رسانا از طریق آنها تسریع گردیده است. از طرفی، به نظر می‌رسد ترکیب سرباره و دوده‌سیلیس (SwCSG) و ترکیب دوده‌سیلیس و متاکائولن (SwCMS) به دلیل حضور دوده‌سیلیس در این نمونه‌ها منجر به افزایش مقاومت الکتریکی بیشتری شد. بررسی نتایج به طور کلی نشان داد که استفاده از آب دریا و ٪۲۵ ماسه لایروبی شده در مخلوط بتن باعث تغییر چشمگیری در نتایج این آزمون نشده و تغییرات در نتایج سایر مخلوط‌های ساخته شده با آب و ماسه دریا، عمدتا به دلیل حضور مکمل‌های سیمانی (پوزولان‌ها) بوده است که هر یک با توجه به خواص خود به لحاظ شیمیایی و فیزیکی، حرکت (انتشار) یون‌های رسانا را در بافت بتن مختل کردند. این آزمایش نشان داد که خواص مکانیکی بتن (شامل: تخلخل، حفرات و نوع اتصالات آنها با یکدیگر، ...) در حرکت و انتشار یون‌های رسانا نسبت به خواص شیمیایی (شامل: نمک-های کوزل و فرایدل، ترکیبات حاوی عنصر آلومینیوم و ترجیحا آلومنیا) موثر تر بوده است.

نفوذپذیری بتن تحت فشار آب

نمودار ارائه شده در شکل (۸) میزان عمق نفوذ نمونه‌ها تحت فشار آب را نشان می‌دهد.





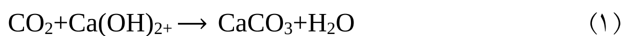
شکل ۸ نتایج آزمون تعیین عمق نفوذ نمونه‌ها تحت فشار آب در سن ۲۸ روز (عمل‌آوری بصورت غرقاب)

همانطور که مشاهده می شود، بتن شاهد SwC از نظر عمق نفوذ، تفاوتی چشمگیری با بتن شاهد (FwC) نداشته است، در همین راستا، یونس و همکاران بیان کردند که استفاده از آب دریا به عنوان آب اختلاط در بتن بر نفوذپذیری و مقاومت در برابر نفوذ کلرید بتن سخت شده تاثیر چشمگیری نمی‌گذارد [30]. در این آزمایش، نتایج شدیدا به پیوستگی، اتصال، ارتباط حفرات و عمل‌آوری صحیح (فرآیند هیدرا سیون کامل) وابسته بوده که نشان می‌دهد ارتباط حفرات با یکدیگر در بتن ساخته شده از آب و ماسه دریا پیچیده‌تر بوده که باعث اختلاف ٪۱۰/۶ حداکثر عمق نفوذ آب با بتن شاهد شده است.

اثربخشی مقادیر بهینه‌ی پوزولان‌های متاکائولن و دوده-سیلیس در بهبود تراکم و ریزساختار ماتریس سیمان در این آزمایش قابل ملاحظه بوده است. عملکرد این پوزولان‌ها عمدتا بر اساس پر کردن ترک‌ها و حفرات مویینه انتقال رطوبت در ماتریس خمیر سیمان می‌باشد که به این شکل در تعیین نتایج این آزمایش موثر بوده‌اند. افزودن متاکائولن ضمن داشتن خاصیت پوزولانی و پرکنندگی نسبی، حداکثر میزان عمق نفوذپذیری بتن SwC را ۲ میلیمتر کاهش داد که مشابه با عملکرد سرباره بوده است. دوده‌سیلیس نیز باعث کاهش نفوذپذیری بتن SwC در سن ۲۸ روزگی به میزان ٪۱۱/۴ شده است که همانند متاکائولن، باعث کاهش میزان نفوذپذری بتن SwC نسبت به بتن شاهد شده است. دوده سیلیس علاوه بر پر کردن خلل و فرج و حفرات مویینه انتقال رطوبت، باعث پیچیدگی (غیر یکنواختی) اتصالات و ارتباط آنها نیز با یکدیگر شده است. سونگ و همکاران نیز نشان دادند که دوده‌سیلیس نفوذپذیری بتن را در صورتی که نسبت جایگزینی آن بیش از ٪۸ باشد، شدیدا کاهش می‌دهد[34]. اکرم نیز نشان داد که دوده‌سیلیس و سرباره، با اصلاح خلل و فرج و ریزساختار بتن، نفوذپذیری آن را در سن ۲۸ روزگی کاهش می‌دهند [35]. استفاده از ترکیب ٪۱۰ دوده‌سیلیس و ٪۵ متاکائولن، منجر به کاهش حداکثر میزان عمق نفوذ در خمیر سیمان بتن SwC به میزان ٪۲۲ شده است. از طرفی افزودن ٪۱۵ سرباره به خمیر سیمان، تاثیر قابل توجهی بر بتن ساخته شه از آب و ماسه لایروبی‌شده دریا نداشته است. همانطور که اشاره شد، دلیل این موضوع، میزان ترک‌های مویینه بیشتر به واسطه‌ی انبساط ترکیبات شیمیایی مانند اترینگایت ناشی از حملات سولفات‌ها بوده است که ازطریق آنها رطوبت و یون‌های رسانا در بافت بتن منتقل می‌شوند.

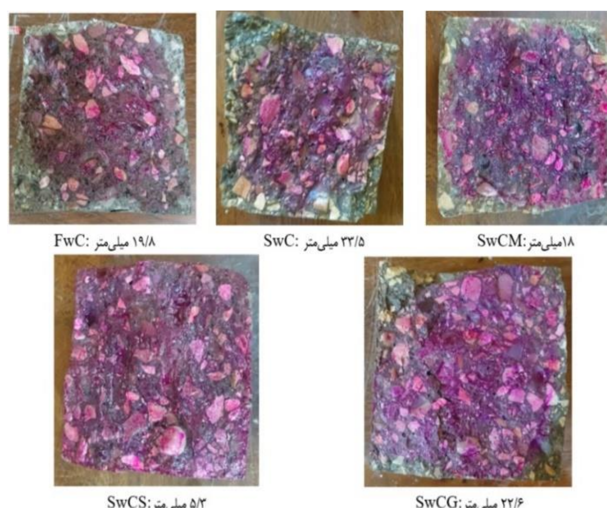
عمق کربناسیون بتن

این آزمایش بر روی نمونه ها پس از قرارگیری به مدت ۱۸۰ روز در شرایط جزرومدی انجام شد. واکنش کربناسیون در سازه‌های بتنی در معرض رطوبت، شامل تشکیل کربنات کلسیم یا کلسیت ($CaCO_3$) با مصرف (تجزیه) $Ca(OH)_2$ بوده (رابطه (۱))، و در این واکنش ژل C-S-H به دلیل کاهش قلیائیت خمیر سیمان به سیلیس آمورف یا کلسیت تبدیل می‌شود که به مراتب دارای تخلخل بیشتری از ژل C-S-H می‌باشد.



$$CO_2+Ca(OH)_{2+} \longrightarrow CaCO_3+H_2O \qquad (۱)$$

میزان عمق کربناسیون آزمونه‌های بتنی در شکل (۹) نشان داده شده است. عمق کربناسیون در بتن شاهد (FwC) کمتر از بتن SwC بوده است که نشان می‌دهد آب شرب نسبت به آب دریا در برابر پیشروی کربناسیون مقاومتر است. این موضوع به دلیل وجود یون سولفات منیزیم در آب دریا است که باعث تسریع در تشکیل هیدروکسیدکلسیم به عنوان یکی از محصولات هیدراسیون سیمان می‌شود، و ترکیب شیمیایی کلسیم هیدراته شده با CO_2 منجر به تشکیل $CaCO_3$ و یا واکنش کربناسیون میگردد. از طرفی نتایج این آزمایش رابطه مستقیمی با تخلخل و ترک‌های مویرگی در ریزساختار بتن دارد [36]. زیرا حضور توام سولفات منیزیم در آب و ماسه لایروبی شده دریا نیز باعث تشکیل حجم زیادی اترینگایت شده که نهایتا با گذر زمان منجر به گسترش ریزترک‌ها و متخلخل شدن ریزساختار بتن گردیده است. بنابراین، از طریق این ریزترک‌ها، حفرات مویینه ناشی از منبسط شدن کریستال‌های اترینگایت، CO_2 نیز به درون بافت بتن نفوذ کرده و باعث پیشروی کربناسیون در اعماق بتن، و نهایتا کاهش ظرفیت اتصال کلرید خمیر سیمان شده است [37]. این موضوع به این دلیل است، که در نواحتی کربناته شده، انحلال-پذیری نمک‌های فرایدل و کوزل افزایش می‌یابد که در صورت تداوم کربناسیون نهایتا تجزیه خواهند شد. این مکانیسم در نمونه-های بتن شاهد (FwC)، بتن ساخته شده از آب و ماسه لایروبی شده (SwC) و نمونه حاوی سرباره (SwCG) بیشتر رخ داده است، زیرا در این نمونه‌ها، نواحی نیمه کربناته شده (به رنگ صورتی روشن) بعضا تا مرکز بتن نیز پیشروی داشته است.



شکل ۹ نتایج آزمایش تعیین عمق کربناسیون آزمونه‌های بتنی پس از قرارگیری به مدت ۱۸۰ روز در شرایط جزرومدی خلیج‌فارس

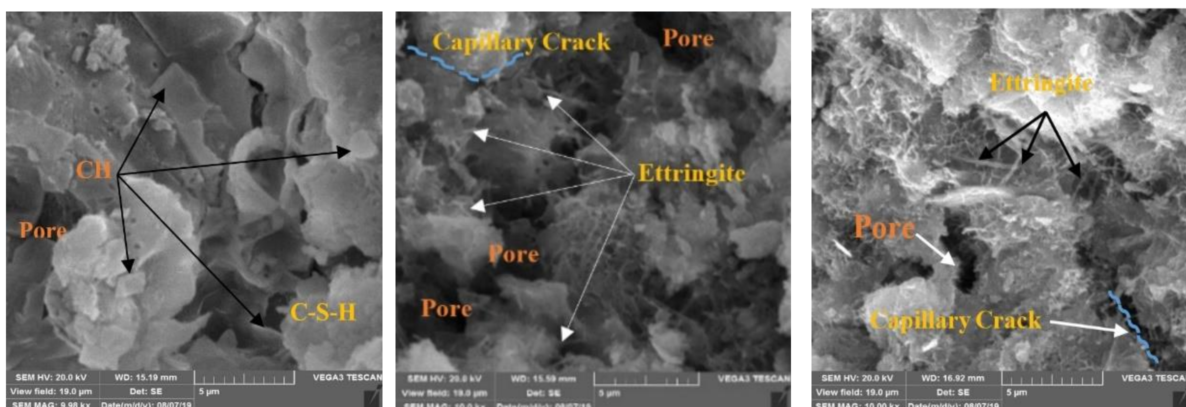
همانطور که گفته شد، به دلیل CO_2 موجود در اتمسفر، واکنش کربناسیون از سطوح خارجی بتن آغاز شده و پیشروی آن بسته به پارامترهای ریزساختاری مانند تخلخل، میزان هیدروکسید کلسیم، قلیاییت (متاثر از افزودنی‌ها و مکمل‌های سیمانی نظیر پوزولانها)، ممکن است تحت تاثیر قرار گیرد. مشاهده می‌شود که افزودن پوزولان‌ها، با تغییر ریزساختار فیزیکی و تراکم خمیر سیمان، باعث کنترل پیشروی و کاهش شدت کربناسیون شده‌اند. در نمونه‌های حاوی دوده‌سیلیس، عمق کربناسیون کمتر از مخلوط‌های دیگر بود، که نشان می‌دهد بتن حاوی دوده‌سیلیس در برابر کربناسیون مقاوم‌تر است. این موضوع به این دلیل است که دوده‌سیلیس با تسریع مصرف کلسیم هیدراته شده ($Ca(OH)_2$)، باعث تجزیه‌ی آن شده و میزان آن را شدیدا کاهش می‌دهد و در ابتدای هیدراسیون باعث کاهش قلیاییت بتن می‌شود، و با جلوگیری از تشکیل هیدروکسید کلسیم، در نهایت $CaCO_3$ کمتری در حضور CO_2 تشکیل خواهد شد. [38]. از طرفی، سرباره با توجه به میزان بالای کلسیم در ترکیبات شیمیای خود، منجر به تشکیل بیشتر هیدروکسید کلسیم و ترکیب با CO_2 شده و در نهایت پتانسیل خوردگی بیشتری در رابطه با تشکیل $CaCO_3$ یا کربناسیون به نسبت متاکائولن و دوده‌سیلیس از خود نشان داده است. به علاوه، سرباره باعث افزایش سطح ناحیه‌ی "نیمه کربناته" شده است که نشان می‌دهد قلیایت بتن کاهش یافته است. لذا استفاده از سرباره در مناطق دریایی، خطر افزایش کربناسیون شدید و حملات بعدی کلریدها را به دنبال خواهد داشت. زیرا در نواحی کربناته شده، ظرفیت اتصال کلرید عملا ناچیز است، این موضوع به این دلیل است که کربناسیون در ابتدا با کاهش pH و قلیاییت، باعث تجزیه نمک‌های فرایدل و کوزل می‌گردد که به این صورت ظرفیت اتصال شیمیایی کلرید در خمیر سیمان را کاهش می‌دهد. از طرفی با تبدیل ژل C-S-H به سیلیس آمورف و کلسیت، تراکم و وزن مخصوص ماتریس خمیر سیمان را کاهش داده و به لحاظ فیزیکی نیز ظرفیت اتصال کلرید خمیر سیمان را کاهش می‌دهد. بنابراین، کلریدهای آزاد به سهولت و آزادانه در بافت بتن پخش (منتشر) می‌شوند و در صورت وجود میلگرد فولادی منجر به خوردگی آن خواهند شد. در سایر نمونه‌ها به علت جایگزین شدن سیمان با متاکائولن و دوده سیلیس، از آهک موجود در خمیر سیمان کاسته شده و $CaCO_3$ کمتری در نتیجه‌ی واکنش شیمیایی بین آهک و CO_2 تشکیل شده است [12].

بررسی ریزساختار بتن

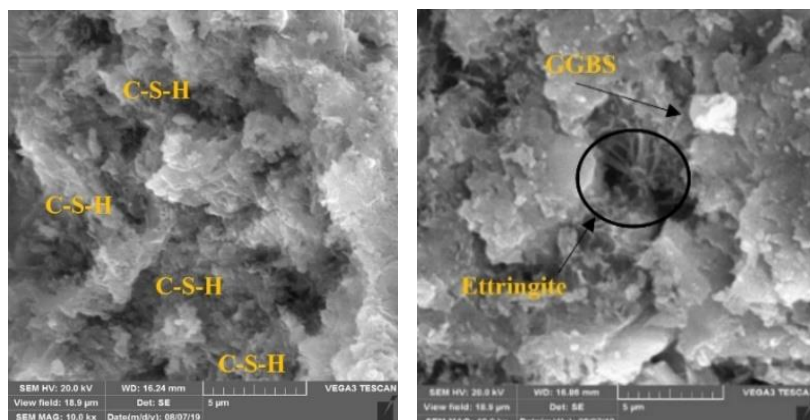
نتایج این آزمایش در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در ریزساختار نمونه‌های شاهد (FwC و SwC)، بافت پیوندهای بین ذرات سیمان و آب شرب از اشکال متبلور هیدروکسید کلسیم منظم همراه با حفره‌های سطحی تشکیل شده است. بررسی آنالیز ریزساختار نشان می‌دهد که ماتریس خمیر سیمان به دلیل عدم وجود پوزولان‌ها کاملا متراکم نشده است. به طور کلی، خمیر سیمان آزمونه‌های حاوی آب دریا، دارای ریزساختاری متراکم‌تر، با مقادیر کمتر منافذ و حفرات با ابعاد بزرگ، اما عمیق‌تر نسبت به خمیر بتن شاهد FwC مشاهده شد. این موضوع را می‌توان به واکنش هیدراسیون سریعتر در سنین پایین خمیر آب دریا نسبت به خمیر سیمان آب شرب نسبت داد که منجر به تشکیل یک ریزساختار متخلخل با اتصالات پیچیده بین حفرات شده است [39]، [40]. همانطور که در نمونه شاهد FwC مشاهده می‌شود، ژل کلسیم سیلیکات هیدرات (C-S-H) توزیع پراکنده‌ای در خمیر آب شرب دارد. از طرفی، خمیر سیمان ساخته شده با آب دریا بافتی سوزنی شکل تشکیل داده است که موجب کاهش سطح تماس مفید با سنگدانه در ناحیه انتقال (مرز مشترک بین سنگدانه و خمیر سیمان)، و اتصال ضعیف با سنگدانه در این ناحیه شده است. این موضوع در نهایت جدا شدن سنگدانه از خمیر سیمان در فشارهای محیطی را در پی خواهد داشت. اترینگایت نیز در

طول فرآیند هیدراسیون خمیر سیمان تشکیل شده است که از لحاظ مورفولوژیکی باعث سوزنی‌تر شدن ریزساختار در ناحیه انتقال خمیر سیمان و سنگدانه شده که عمدتا به واسطه‌ی واکنش شیمیایی بین هیدروکسید کلسیم و سولفات‌های موجود بوده است. به طور کلی، اترینگایت بیشتر در طرح اختلاط‌هایی مشاهده می‌شود که هیدروکسید کلسیم بیشتری در ترکیب شیمیایی مصالح سیمانی خود داشته‌اند، که شامل سرباره می‌شود. لازم به ذکر است خود سیمان نیز به دلیل وجود مقادیر بالای آهک، در معرض با محیط‌های سولفاتی، پتانسیل زیادی برای تشکیل اترینگایت یا گچ دارد. گچ ممکن است از تجزیه (دکامپوزیت) شدن اترینگایت در محیط‌های سولفاتی شدید تولید شود، و از لحاظ موفولوژیکی اندکی بزرگ‌تر از کریستال‌های اترینگایت است، اما در این تحقیق، با توجه به پایداری بیشتر اترینگایت در محیط‌های غنی از سولفات‌ها این فاز مشاهده نشد [30].

افزودن مکمل سیمانی متاکائولن به میزان ۵٪، تا حدودی موجب کاهش تخلخل، اندازه و مقدار کریستال‌های هیدروکسید کلسیم در ناحیه انتقال SwC شده است. در طرح اختلاط مذکور (SwCM)، بافت ناحیه انتقال، سوزنی شکل تا حدودی ثابت باقی مانده است، اما متاکائولن پس از پر کردن نسبی فضاهای خالی، موجب تراکم بیشتر نسبت به SwC شده است[25].



FwC SwC SwCM



SwCS SwCG

شکل ۱۰ ریزساختار و مورفولوژی نمونه‌ها در سن ۲۸ روز با بزرگنمایی ۱۰ هزار برابری. هیدروکسید کلسیم :(CH)، کلسیم-سیلیکات-هیدرات :(C-S-H)، اترینگایت: (Ettringite)، سرباره: (GGBS)، حفرات و ترک‌های موینه:Pore & Capilary crack

افزودن ٪۱۰ دوده‌سیلیس به SwC باعث کاهش تعداد و عمق منافذ و مقدار کریستال‌های هیدروکسید کلسیم و لبه‌های ناهموار آنها در ناحیه انتقال بتن شده است. این موضوع نشان می‌دهد که روند مصرف (تجزیه) هیدروکسید کلسیم با افزودن دوده‌سیلیس سرعت یافته است و همچنان ادامه دارد و این ناحیه از لحاظ مکانیکی تقویت شده است. از طرفی، ناحیه انتقال در مخلوط SwCS یک بافت منسجم و متراکم از C-S-H نشان می‌دهد که می‌تواند به دلیل خاصیت ریزدانگی، منبع بالای SiO_2 و واکنش-پذیری دوده‌سیلیس باشد. آنالیز SEM نشان می‌دهد که افزودن دوده‌سیلیس به بتن SwC، منجر به تراکم بیشتر خمیر سیمان در ناحیه‌ی انتقال، به نسبت دو پوزولان دیگر شده است؛ این موضوع باعث اتصال و سطح تماس بیشتر سنگدانه و شیره‌ی سیمان شده که دلیل دیگری بر مقاومت فشاری مطلوب این طرح اختلاط می‌باشد. افزودن ٪۱۵ سرباره به خمیر سیمان ساخته شده از آب دریا منجر به تشکیل یک بافت لایه‌ای زبر در ناحیه‌ی انتقال بتن شده است. این ترکیب باعث ایجاد یک سطح ناهموار با تخلخل سطحی کم، ولی گسترش ریزترک‌ها و منافذ عمیق در میان این بافت لایه‌ای گردیده است[5]. همانطور که پیشتر بیان شد، در این آنالیز می‌توان مشاهده نمود که حضور آهک (CaO) بیش از حد در این پوزولان، منجر به تشکیل هیدروکسید کلسیم حین فرآیند هیدراسیون و واکنش شیمیایی آن با سولفات منیزیم شده که نهایتا باعث تشکیل محصولات منبسط شونده مانند کریستال‌های اترینگایت شده است. در خمیر سیمان این طرح اختلاط (SwCG)، کریستال‌های اترینگایت به وضوح قابل مشاهده هستند که در نهایت منجر به تشکیل حفره و تشدید تخلخل در اطراف خود و افت خواص مکانیکی بتن شده‌اند.

نتیجه‌گیری

این تحقیق به منظور بررسی میدانی تاثیر پوزولان‌های متاکائولن (٪۵)، سرباره (٪۱۵)، دوده‌سیلیس (٪۱۰) بر پارامترهای دوام بتن ساخته شده از ماسه لایروبی شده و آب خلیج‌فارس (مستخرج از بندر شهید رجایی بندرعباس) در شرایط جزرومدی صورت گرفت که نتایج زیر حاصل شدند:

۱. استفاده از ٪۲۵ ماسه لایروبی شده و آب خلیج فارس، به دلیل حضور نمک‌های کلرید، خواص مکانیکی بتن را حدود ٪۶ در سنین اولیه (۷روزه) بهبود بخشید، اما تا سن ۲۸ روزگی به دلیل افزایش تدریجی تخلخل ناشی از تورم اترینگایت و گچ در نتیجه‌ی حملات سولفات‌ها، کاهش تدریجی مقاومت فشاری را به دنبال داشت.

۲. دوده‌سیلیس (٪۱۰) به علت مقادیر بالای SiO_2 و واکنش پذیری شدید با کلریدهای آب دریا، ضمن افزایش چشمگیر سرعت گیرش اولیه و کاهش اسلامپ، باعث تشکیل ریزساختار متراکم ژل C-S-H شد. از طرفی ترکیبات شیمیایی دوده‌سیلیس باعث جلوگیری از تشکیل بیش از حد هیدروکسید کلسیم شد، که در نهایت با توجه به تراکم قابل قبول و کمبود هیدروکسید کلسیم برای تشکیل کلسیت، باعث جلوگیری از پیشروی کربناسیون و تشکیل اترینگایت و گچ در بافت بتن شد.

۳. نتایج نشان داد افزودن متاکائولن (٪۵)، خواص مکانیکی ریزساختار بتن ساخته شده از آب و ماسه دریا را به میزان ناچیزی ارتقا می‌دهد، ولیکن استفاده از این پوزولان به علت حضور منبع بالای آلومینا در مواردی که حضور کلریدها بحرانی است موثرتر خواهد بود و در مواردی که علاوه بر کلریدها، سولفات‌ها نیز حضور داشته باشند، تاثیر چشمگیری ندارد و عمدتا باعث تشکیل محصولات منبسط شونده مانند اترینگایت می‌گردد.

۴. استفاده از ٪۱۵ سرباره، علیرغم بهبود جزیی خواص مکانیکی، به دلیل منبع بالای CaO در ترکیبات شیمیایی خود، در محیط-های دریایی، منجر به تشدید (پیشروی) کربناسیون، و همچنین افزایش محصولات حجیم شونده ناشی از حملات منیزیم سولفات ($MgSO_4$) می‌شود. بنابراین، استفاده از سرباره با این شرایط، در بتن‌های مورد استفاده در شرایط دریایی (جزرومدی خلیج فارس) منجر به بهبود پارامترهای مقاومت و دوام نخواهد شد.

سپاسگزاری .

مراجع

[1] M. Khatibmasjedi, S. Ramanathan, P. Suraneni, and A. Nanni, “Compressive strength development of

seawater-mixed concrete subject to different curing regimes," ACI Mater. J., vol. 117, no. 5, 2020. doi: 10.14359/51725973.

[2] U. Ebead, D. Lau, F. Lollini, A. Nanni, P. Suraneni, and T. Yu, "A review of recent advances in the science and technology of seawater-mixed concrete," Cement and Concrete Research, vol. 152, p. 106666, 2022. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106666

[3] M. Jahani, S. Shahnoori, S. Moradi, and C. Ershadi, "Cleaner Production Towards a Green Concrete ; Multi-scale Experimental Study on Long-Term Performance of a Sustainable Modified-SWSSC," vol. 6, no. 6, pp. 43–59, 2022. https://doi.org/10.11648/j.ajcbm.20220601.14

[4] S. Moradi, S. Shahnoori, S. T. Tabatabaei Aghda, and C. Ershadi, "Study of resistance and durability parameters of Roller Compacted Concrete Pavement made of Dredged Marine Sand extracted from the coastal areas of Persian Gulf (Shahid Rajaee port)," Concr. Res., vol. 11, no. 3, pp. 41–53, 2018. (In Persian). https://doi.org/10.22124/jcr.2018.7437.1239

[5] S. Moradi, and S. Shahnoori, "Eco-friendly mix for Roller-Compacted Concrete: Effects of Persian-Gulf-Dredged marine sand on durability and resistance parameters of concrete," Construction and building Materials, vol. 281, pp. 122555, 2021. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122555.

[6] A. Shayan, A. Xu, G. Chirgwin, and H. Morris, "Effects of seawater on AAR expansion of concrete," Cement Concrete Research, vol. 40, no. 4, pp. 563-568, 2010. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.09.008

[7] H. H. Steinour, "Concrete Mix Water--How Impure Can It Be?," 1960.

[8] M. Jahani, S. Shahnoori, and S. Moradi, "Long Term observations in an Experimental study on durability of a Sustainable Concrete Made with Sea-water and Sea-sand in Tidal Conditions," 2022.

[9] M. Khatibmasjedi, S. Ramanthan, P. Suraneni, and A. Nanni, "Shrinkage behavior of cementitious mortars mixed with seawater," Adv. Civ. Eng. Mater., vol. 8, no. 2, pp. 64–78, 2019. https://doi.org/10.1520/ACEM20180110

[10] A. M. Rashad, and A. S. Ouda, "Effect of tidal zone and seawater attack on high-volume fly ash pastes enhanced with metakaolin and quartz powder in the marine environment," Microporous and Mesoporous Materials, vol. 324, pp. 111261, 2021. https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.111261

[11] X. Shen, Q. F. Liu, Z. Hu, W. Q. Jiang, X. Lin, D. Hou, and P. Hao, "Combine ingress of chloride and carbonation in marine-exposed concrete under unsaturated environment: A numerical study," Ocean Engineering, vol. 189, pp. 106350, 2019. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106350

[12] Y. Yi, D. Zhu, S. Guo, Z. Zhang, and C. Shi, "A review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the marine environment," Cement Concrete Composites, vol. 113, pp. 103695, 2020. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103695

[13] X. Jiang, S. Mu, Z. Yang, J. Tang, and T. Li, "Effect of temperature on durability of cement-based material to physical sulfate attack," Construction and Building Materials, vol. 266, pp. 120936, 2021. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120936

[14] J. Liu, G. Ou, Q. Qiu, X. Chen, J. Hong, and F. Xing, “Chloride transport and microstructure of concrete with/without fly ash under atmospheric chloride condition,” Construction and Building Materials, vol. 146, pp. 493–501, 2017. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.018

[15] R. M. De Gutiérrez, L. N. Diaz, and S. Delvasto, “Effect of pozzolans on the performance of fiber-reinforced mortars,” Cement Concrete Composites, vol. 27, no. 5, pp. 593–598, 2005. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.010

[16] S. Cheng, Z. Shui, T. Sun, Y. Huang, and K. Liu, “Effects of seawater and supplementary cementitious materials on the durability and microstructure of lightweight aggregate concrete,” Construction and building Materials, vol. 190, pp. 1081–1090, 2018. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.178

[17] D. L. Pillay, O. B. Olalusi, M. W. Kiliswa, P. O. Awoyera, J. T. Kolawole, and A. J. Babafemi, “Engineering performance of metakaolin based concrete,” Cleaner Engineering and Technology, vol. 6, p. 100383, 2022. https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100383

[18] M. Valipour, F. Pargar, M. Shekarchi, and S. Khani, “Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study,” Construction and building Materials, vol. 41, pp. 879–888, 2013. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.054

[19] W. A. Al-Kutti and N. M. Al-Akhras, “The durability of partially-damaged concrete with the addition of silica fume and ground granulated blast furnace slag,” Key Engineering Materials, vol. 711, pp. 277–284, 2016. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.711.277

[20] Jahani, A., Estabragh, A. R., Khajepour, H., & Amini, M. (2022). Comparison of the Effect of Cement, Ground Granulated Blast-Furnace Slag (GGBS), and Activated GGBS on Stabilization of a Clay Soil. Ferdowsi Civil Engineering, vol.35, no.3. doi:10.22067/jfcei.2022.74908.1115

[21] A. R. Estabragh, A. Jahani, A. A. Javadi, and M. Babalar, “Assessment of different agents for stabilisation of a clay soil,” International Journal of Pavement Engineering, vol. 23, no. 2, 2022. https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1736293

[22] ASTM Committee, “Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying, ASTM C566-97,” Annu. B. ASTM Stand., vol. 97, no. Reapproved 2004, pp. 5–7, 1997.

[23] C128/C128M, “Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption,” ASTM International, pp. 1–6, 2001.

[24] ASTM C143/C143M, “Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete,” Astm C143, no. 1, pp. 1–4, 2015.

[25] Z. Shi, Z. Shui, Q. Li, and H. Geng, “Combined effect of metakaolin and sea water on performance and microstructures of concrete,” Construction and building Materials, vol. 74, pp. 57-64, 2015. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.023

[26] “Bs 1881 Part 124 Pdf 14l 1 / 3,” pp. 3–5, 1881.

[27] ACI Committee 222, “Protection of Metals in Concrete Against Corrosion,” Aci 222R-01, pp. 1–41, 2001.

[28] Limeira, J., Etxeberria, M., Agulló, L., & Molina, D. (2011). Mechanical and durability properties of concrete made with dredged marine sand. Construction and building materials, 25(11), 4165-4174. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.053

[29] O. Cascudo, P. Pires, H. Carasek, A. De Castro, and A. Lopes, "Evaluation of the pore solution of concretes with mineral additions subjected to 14 years of natural carbonation," Cement Concrete Composites, vol. 115, pp. 103858, 2021. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103858

[30] A. Younis, U. Ebead, P. Suraneni, and A. Nanni, "Fresh and hardened properties of seawater-mixed concrete," Construction and building Materials, vol. 190, pp. 276–286, 2018. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.126

[31] P. Sikora, K. Cendrowski, M. Abd Elrahman, S. Y. Chung, E. Mijowska, and D. Stephan, "The effects of seawater on the hydration, microstructure and strength development of Portland cement pastes incorporating colloidal silica," Applied Nanoscience, vol. 10, no. 8, pp. 2627-2638, 2020. https://doi.org/10.1007/s13204-019-00993-8

[32] Y. Demir, H. Yaprak, and O. ŞİMŞEK, "The effect of sea water on the properties of concrete with silica fume admixture," Cem. Wapno Bet., vol. 15, no. 1, 2010.

[33] M. Williams, J. M. Ortega, I. Sánchez, M. Cabeza, and M. Á. Climent, "Non-destructive study of the microstructural effects of sodium and magnesium sulphate attack on mortars containing silica fume using impedance spectroscopy," Applied Science, vol. 7, no. 7, p. 648, 2017. https://doi.org/10.3390/app7070648

[34] H. W. Song, S. W. Pack, S. H. Nam, J. C. Jang, and V. Saraswathy, "Estimation of the permeability of silica fume cement concrete," Construction and building Materials, vol. 24, no. 3, pp. 315–321, 2010. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.033

[35] M. R. Akram, and S. Raza, "Effect of micro silica and ggbs on compressive strength and permeability of impervious concrete as a cement replacement," Eur. Acad. Res., vol. 3, no. 7, pp. 7456–7468, 2015.

[36] S. A. Barbhuiya, P. A. M. Basheer, M. W. Clark, and G. I. B. Rankin, "Effects of seawater-neutralised bauxite refinery residue on properties of concrete," Cement Concrete Composites, vol. 33, no. 6, pp. 668–679, 2011. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.03.010

[37] S. Sadati, M. K. Moradllo, and M. Shekarchi, "Long-term durability of onshore coated concrete—chloride ion and carbonation effects," Frontiers of Structural and Civil Engineering, vol. 10, no. 2, pp. 150–161, 2016. https://doi.org/10.1007/s11709-016-0341-2

[38] H. Li, N. Farzadnia, and C. Shi, "The role of seawater in interaction of slag and silica fume with cement in low water-to-binder ratio pastes at the early age of hydration," Construction and building Materials, vol. 185, pp. 508-518, 2018. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.091

[39] M. Guo, B. Hu, F. Xing, X. Zhou, M. Sun, L. Sui, and Y. Zhou, "Characterization of the mechanical properties of eco-friendly concrete made with untreated sea sand and seawater based on statistical analysis," Construction and building Materials, vol. 234, pp. 117339, 2020.

https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117339
[40] M. Jahani, S. Moradi, S. Shahnoori, "4-year monitoring of degradation mechanisms of seawater sea-sand concrete exposed to tidal conditions: development of chemical composition and micro-performance," Constr. Build. Mater., vol. 409, pp. 133475, 2023. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133475